

Железосодержащие пыли и шламы черной металлургии

Предприятия черной металлургии относятся к числу наиболее крупных народнохозяйственных объектов, в значительной степени определяющих уровень экономического развития России. Одновременно они являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды. На их долю приходится 15-20% промышленных выбросов России в атмосферу (1,6 млн т/год твердых дисперсных материалов; 7,3 млн т/год газообразных веществ, в том числе оксидов азота, серы, углерода) и в водоемы (около 4 млрд т/год).

Вместе с тем образующиеся на предприятиях черной металлургии железосодержащие отходы представляют собой крупный сырьевой источник для производства черных и цветных металлов. Их утилизация решает проблемы экономии природного сырья, существенного уменьшения выбросов, загрязняющих атмосферу, водоемы, почву.

Используемые в настоящее время способы утилизации железосодержащих отходов в основном рассчитаны на вовлечение больших объемов пылей и шламов, как содержащих цветные металлы, так и при их низкой концентрации (пыли образуются при применении сухих, а шламы — мокрых способов очистки газов).

Для отходов с малым содержанием цветных металлов наиболее разработаны способы их утилизации в аглошихте. При соответствующей подготовке (оптимальная влажность, предварительное окомкование) введение отходов в агломерационный процесс приводит к экономии значительного количества первичных шихтовых материалов, равных по массе пылям и шламам мартеновского и электросталеплавильного переделов, колошниковой пыли доменного производства.

При ощутимых содержаниях вредных примесей (цинка, свинца, калия, натрия и др.) в пылях и шламах требуются дополнительные мероприятия по их переработке перед утилизацией. Выбор необходимого для этого способа зависит от содержания вредных примесей, дисперсного состава отходов и целей, поставленных перед производством.

В настоящее время предложен, опробован и внедрен в промышленных масштабах ряд технологических процессов переработки пылей и шламов в кондиционные материалы черной металлургии с одновременным выделением примесей цветных металлов в продукт, пригодный для дальнейшего использования на предприятиях цветной металлургии

(вельцевание, плавка в жидкой ванне, шахтных печах, плазменные технологии, гидрометаллургия и др.).

Разрабатываются также способы обогащения цветными металлами пылей и шламов с целью их последующей утилизации. В этом плане весьма перспективно обогащение в пирометаллургических агрегатах, традиционно применяемых в черной металлургии (дуговые печи, кислородные конвертеры и т.п.).

Для шламов, содержащих цветные металлы, перспективной может оказаться также их попутная (совместная) переработка в крупномасштабных процессах цветной металлургии, при производстве цемента и других строительных материалов с целью остекловывания и перевода в экологически безопасные продукты (отвалы шлаки, цементный клинкер, керамика и др.). Подходящим металлургическим процессом является, например, плавка на штейн на медеплавильных заводах, не требующая окискования сырья.

Рассмотрим подробнее количество, химический состав, свойства и основные способы переработки железосодержащих отходов черной металлургии.

3.1. Количество, химический состав и свойства

Ежегодно в мировой черной металлургии образуется около 49 млн т пылей и шламов, в том числе (кг/т целевого продукта): при агломерации — 20; в производстве чугуна — пыли 8-12, шлама 4-6; в конвертерном переделе стали — 15-16, в электросталеплавильном — 3,0-4,5 (Reprocessing...).

Годовой выход дисперсных железосодержащих отходов предприятий черной металлургии на территории СНГ составлял около 15 млн т, из них — по 3,0 млн — шламы агломерации и доменного производства, 1,3 млн — сталеплавильного передела (*Вторичные...* 1986 г.). Их химический состав представлен в табл. 3.1.

Шламы агломерационных фабрик по основным химическим компонентам близки к агломерационной шихте. Они в основном состоят из оксидов железа (магнетит, гематит) и значительной доли углерода. Их отличается полидисперсный состав: до 12% частиц в них крупнее 2,5 мм и до 13% менее 0,08 мм. Плотность аглошламов 3,6-4,0 г/см³, удельный выход ~3,0% массы агломерата.

Железосодержащие отходы доменного производства улавливают на стадиях грубой и более тонкой очистки. На первой из них (в газоходах и сухих циклонах) оседает так называемая колошниковая пыль, на второй, мокрой, стадии образуется доменный шлак. Колошниковая

пыль по составу близка к шихте доменных печей при содержании частиц крупностью +100 мкм, как правило, более 60% и плотности 3,15-3,8 г/см³. Доменные шламы более дисперсны и содержат 5-30% частиц крупнее 100 мкм, 60-85% размером 8-100 мкм и 10-20% менее 8 мкм. Их плотность составляет 2,7-3,8 г/см³, выход достигает 2,5% от массы чугуна. Основными железорудными минералами доменных отходов являются гематит, магнетит, маггемит, вюстит, а также гидрогематит — продукт гидратации оксидов железа в мокрых системах пылеулавливания.

Таблица 3.1

Химический состав железосодержащих отходов
российских предприятий

Отход производства	Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	Zn	C
Пыли и шламы агломерации	48-70	2-20	5-10	1-3,5	0,5-6	0,2-0,6	0,01-0,35	2-10
Колошниковая пыль	25-50	7-10	5-6	1-3	1-3	0,3	0,2-1,2	3-8
Доменный шлак	30-45	3-20	6-11	2-3,5	0,1-3	0,2-1,35	0,5-15	3-25
Мартеновский шлак	57-64	0,8-1,3	0,7-2,2	0,2-0,7	1,0-4,2	0,04-0,8	Следы	0,25-0,7
Конвертерный шлак	41-66	3-20	1,4-2,0	0,1-0,3	0,15-1,5	0,04-0,3	0,2-4,2	0,7-4,3
Электросталеплавильный шлак	30-55	1,5-17	2-12	0,3-10	5-27	0,02-0,5	До 2	—

Железосодержащие отходы сталеплавильного производства включают пыли и шламы мартеновского, конвертерного и электросталеплавильного переделов.

Мартеновские шламы наиболее богаты по содержанию железа и высокодисперсны (63-84% кл. -32 мкм). Их плотность 4,5-5,0 г/см³, выход порядка 1,5% от массы стали.

Конвертерные шламы почти так же богаты по содержанию железа, как и мартеновские, но более грубы по гранулометрии: 30-35% частиц крупнее 100 мкм, 50-60% составляет фракция 8-100 мкм, до 20% — кл. менее 8 мкм. Их плотность 3,5-5,0 г/см³, выход около 2,0% от массы выплавляемой стали.

Шламы газоочистки электросталеплавильных печей беднее по железу, но разнообразнее по составу. Так, в зависимости от марок выплавляемых сталей, в шлаках может содержаться, %: 1,5-5,5 MnO, до 10 Cr, до 8 Ni, до 1 Pb и т.д. Отходы достаточно плотны

(3,0-4,5 г/см³) и мелкодисперсны, содержат до 60% кл. 100-5 мкм и до 20-40% фракции -5 мкм. Их выход зависит от ряда факторов, прежде всего от состава шихты, и меняется в широких пределах (0,5-7,5%), составляя в среднем около 1,5%.

Физико-химические свойства и химико-минералогический состав пылей и шламов сталеплавильного и доменного производств, по данным исследований автора, принципиально не отличаются друг от друга.

Коэффициент использования отходов достаточно велик, %: для шламов агломерационных — 80-100, доменных — 70, мартеновских — 70-100, конвертерных, электросталеплавильных, колошниковой пыли — 100.

Разнообразный состав железосодержащих пылей и шламов предопределяет возможное значительное количество стадий их переработки, для каждой из которых известно несколько основных технологий.

Как правило, первая стадия в схеме утилизации отходов — их обезвреживание, сочетаемое в ряде случаев с обогатительными процессами удаления нежелательных для материалов черной металлургии примесей, прежде всего цинка. Он, а также такие примеси, как свинец, щелочные металлы и сера, при высокотемпературной переработке отходов легко возгораются. Затем они вновь переходят в пыль, постепенно накапливаясь в ней до пределов, ухудшающих качество основного металла (чугуна, стали), если отсутствуют мероприятия по выводу пыли из замкнутого цикла переработки. Наличие цинка, свинца и щелочных металлов в отходах при их использовании в доменной шихте является одной из причин образования настывей, разрушения кладки доменной печи и уменьшения прочности кокса при плавке, что приводит к нарушению ее хода. Избыточные количества серы в отходах переходят в чугун и сталь, снижая их сортность.

Вместе с тем содержание цветных металлов в рассмотренных отходах недостаточно, чтобы считать последние эффективным сырьем для их извлечения на предприятиях цветной металлургии.

Таким образом, решение проблемы возвращения железосодержащих отходов в сферу производства зачастую связано с необходимостью разработки способов удаления из них вредных примесей и подготовки, обычно окускованием, к последующему переделу на предприятиях черной металлургии.

Извлечение цветных металлов, серы и других примесей из дисперсных отходов и подготовку пылей и шламов к последующему переделу осуществляют разнообразными гидromеталлургическими и пирометаллургическими методами, часто сочетая их с окускованием дисперсных продуктов.

3.2. Обезвоживание и обогащение

Влажные шламы затруднены в транспортировании, плохо смешиваются с другими компонентами шихты, «замазывают» оборудование, снижают качество окускованного продукта. Вместе с тем на эффективность обезвоживания и выбор применяемой для него аппаратуры существенно влияют физико-химические свойства того или иного материала.

Для обезвоживания шламов аглопроизводства используют гидроциклоны и спиральные классификаторы, радиальные сгустители, центрифуги, ленточные и дисковые вакуум-фильтры. Его обычная схема включает фильтрование или центрифугирование до влажности шламов на уровне 15-25%. Дальнейшее уменьшение влажности, как правило, достигается термической сушкой в барабанах. Ее снижения после механического обезвоживания можно добиться также смешением шлама с сухими железосодержащими продуктами (горячим возвратом аглофабрик, колошниковой пылью) или со способными к гидратации (химическому связыванию влаги) материалами, например негашеной известью, включая ее отходы, образующиеся при обжиге известняка на металлургических предприятиях.

Близка к описанной схема обезвоживания доменных шламов, если не требуется их обесцинкование или удаление других примесей, мешающих нормальному ходу доменного процесса. Основная проблема здесь — обесцинкование. На предприятиях черной металлургии для этого обычно применяют механические способы.

Одна из принципиальных схем подготовки доменных шламов представлена на рис. 3.1. Ее реализация позволяет получить малоцинковистый продукт, пригодный в качестве железосодержащего компонента металлургических шихт или цементной сырьевой смеси. Кек при повышенной (более 12%) массовой доле цинка в нем может быть рентабельно переработан в специализированных производствах с извлечением этого металла.

Механическое обесцинкование обычно осуществляют в гидроциклонах различных моделей или других аналогичных по принципу работы аппаратах.

Такое оборудование с 1977 г. используется в системе мокрой очистки колошникового газа доменных печей завода фирмы «Фудзи сэйтэцу» (Япония). Перерабатываются как доменные шламы текущего производства (1500 т/мес. по сухой пыли), так и из отвалов. Параллельно установлено шесть гидроциклонов. Выход сгущенного осадка в них достигает 75% от исходного шлама при извлечении в него железа и углерода 83 и 77% соответственно. Его состав, %: 38 Fe; 27,6 C; 1 Zn (исходный

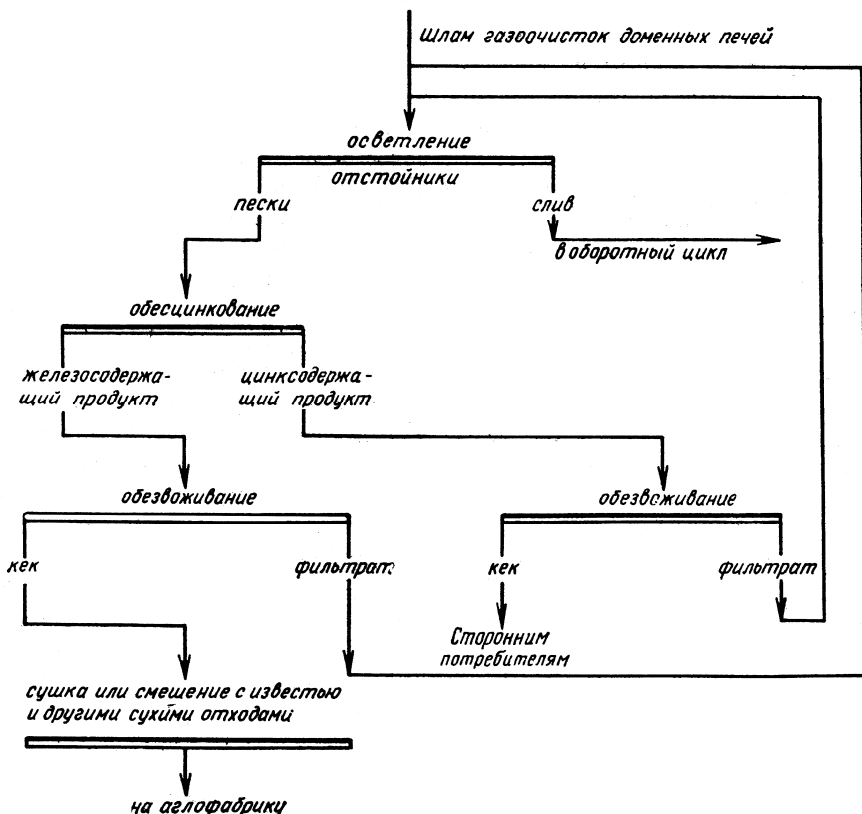


Рис. 3.1. Принципиальная схема подготовки цинксодержащих шламов доменной газоочистки к утилизации

шлам содержит, %: 34 Fe; 27 С; 3-5 Zn). Выход пыли в верхний слив гидроциклона составляет 25%, она содержит 18% Fe, 13% Zn и 23% С. Цинк при этом концентрируется в самой тонкой ее фракции (<10 мкм). Сгущенный осадок гидроциклонов обезвоживают в барабанном вакуум-фильтре. Полученный кек совместно с колошниковой и сталеплавильной пылями окомковывают на тарельчатом грануляторе до микроокатышей диаметром 1-5 мм, которые применяют в аглошихте. Наличие в микроокатышах углерода позволяет снизить расход коксика на 2 кг/т агломерата. Верхний слив гидроциклонов поступает в отстой-

ник, осадок которого обезвоживают на фильтр-прессе и используют как сырье для извлечения цинка (Борисов...).

Классификация доменных шламов в гидроциклонах с 1993 г. внедрена и на предприятиях компании «Бритиш стил». При этом в плавку возвращается 70-80% железосодержащей части шлама (Recycling...).

Работает также установка, на которой сухую колошниковую пыль разделяют на железо- и цинксодержащие продукты обычной магнитной сепарацией. Степень извлечения цинка в целевой продукт составляет 85%, очищенная колошниковая пыль применяется в доменной аглошихте.

При использовании механических способов степень извлечения цинка в целевой продукт на 10-15% ниже, чем по пирометаллургическим технологиям (разд. 3.8). Однако в ряде случаев механическое обесцинкование может оказаться предпочтительнее, так как значительно дешевле и проще в эксплуатации.

Наиболее рациональный вариант обезвоживания конвертерных шламов — схема, предусматривающая радиальный стугитель, вакуум-фильтрацию и сушку во вращающихся барабанах. Установки с барабанными вакуум-фильтрами работают в Великобритании, Голландии и других странах. На некоторых заводах США применяют осадительные центрифуги. При наличии в достаточном количестве сухих отходов обезвоживание можно реализовать, смешивая их со шламами.

В ряде случаев для повышения качества перерабатываемой конвертерной пыли используют обогатительные методы. Так, фирма «Бэтлэ-хэм стил корпорэйшн» внедрила способ флотационного удаления железорудной части из пылей. Донный продукт флотомашин, в который в основном переходит железосодержащий компонент, поступает на производство окатышей.

На Магнитогорском металлургическом комбинате освоено флотационное обогащение пыли ККЦ, содержащей 66,1% Fe и 10,5% C. Продуктами флотации являются железосодержащий продукт (72,7% Fe% 1,7% C) и углеродсодержащий концентрат (82,7% C; 8,6% Fe). Первый используется в агломерационной шихте, второй применяется в фасонно-литейном цехе и цехе изложниц для обработки рабочих поверхностей форм при получении отливок с особо чистой поверхностью (Получение...).

Шламы мартеновских газоочисток характеризуются высокой дисперсностью, их подготовка к утилизации затруднена из-за плохих седиментационных и фильтрационных свойств. В связи с этим технологические схемы сгущения и обезвоживания имеют некоторые особенности. Сгущение ведется в одном аппарате без предварительной классификации шламов, которая не требуется благодаря узкому интервалу крупности частиц. Для обезвоживания чаще применяют фильтр-

прессы, так как на вакуум-фильтрах не всегда удается достигнуть его удовлетворительной степени. Учитывая это, следует отдавать предпочтение подготовке шламов мартеновских газоочисток в общих корпусах подготовки железосодержащих отходов (*Красавцев...*).

На зарубежных заводах для их обезвоживания используют центрифуги. Так, на заводе «Индиана Харбор» фирмы «Янгстоун Шит энд Тьюб Ко» (США) вакуум-фильтры для обезвоживания мартеновских шламов работали неудовлетворительно и были заменены центрифугами.

Сложнее проблема утилизации шламов газоочисток электросталеплавильных печей из-за более низкого содержания железа, высокого — цветных металлов и мелкодисперсности. Кроме того, для шламов электросталеплавильных печей характерны большие колебания их состава, что обусловлено плавкой различных марок стали, а следовательно, изменением химического состава шихты.

Обычно подготовка шлама электропечей осуществляется совместно с другими видами шламов. Для их самостоятельного обезвоживания в нашей стране применяют схемы на фильтр-прессах, аналогичные мартеновским шламам.

За рубежом для обезвоживания шламов электропечей используют центрифуги. В США в период с 1961 по 1971 г. фирмой «Бэрд Мэшин Ко» установлено около 30 осадительных центрифуг для обезвоживания шлама конвертерных и электросталеплавильных цехов (While).

3.3. Гидрометаллургическая переработка

Гидрометаллургические способы переработки пылей и шламов сталеплавильного производства с целью удаления вредных примесей нашли определенное распространение за рубежом.

На металлургическом заводе в Дортмунде фирмы «Хеш-Вестфаленхютте» внедрен способ обработки пыли, улавливаемой из отходящих газов мартеновских печей (Hauske...). Пыль из электрофильтров непрерывно подают в бассейн, наполненный водой. Одновременно в него вводят NaOH, поддерживая величину pH раствора на уровне 9,3-9,8. В этих условиях растворимые соли цинка и свинца переходят в нерастворимые соединения. Полученную однородную суспензию перекачивают в смесители, где разбавляют водой в пропорции 1:2, и добавлением NaOH доводят pH до 8,7 — 9,0. После осветления раствора в течение 30-60 мин и обезвоживания шлама в пресс-фильтре получают кек влажностью 40%, содержащий нерастворимые соединения цинка и свинца. Фильтрат сбрасывают в водосборный бассейн, а кек, содержащий 25-35% Zn и 9-12% Pb, отгружают на за-

вод цветной металлургии в Дуйсбурге для дальнейшей переработки. Расход NaOH составляет 100 т при выходе кека 600 т.

В Канаде опробован в промышленных условиях способ двухстадийной обработки пыли дуговых печей, предусматривающий применение отработанного травильного раствора в качестве реагента для выщелачивания, а извести и кремнеземистых материалов — для осаждения силикатов металлов (Ргес...).

В Италии на заводе фирмы «Ферьер Норд» в Оконно в 1996 г. введена в действие первая крупная промышленная установка, разработанная фирмой «Импienti». Она рассчитана на утилизацию 10 тыс. т/год электросталеплавильных пылей с извлечением 2 тыс. т цинка. Метод, получивший название «Езинекс», предусматривает выщелачивание пыли в течение 1 ч при 70-80°C раствором NH₄Cl с добавлением хлоридов щелочных металлов. Это обеспечивает переход в него оксидов цинка и других цветных металлов. Извлечение цинка в раствор зависит от соотношения Zn/Fe. При его значениях 1 и более 2 оно составляет соответственно 60 и 80%. Раствор отфильтровывают и обрабатывают цинковой пылью для выделения из него меди, свинца, никеля, кадмия, которые продают на заводы вторичного сырья. Оставшийся раствор подвергают электролизу для получения цинка. Последний по своему качеству пригоден для горячего цинкования стального листа и как товарный металл. Расход электроэнергии при электролизе составляет 2600 кВт·ч/т цинка. Из отработанного электролита кристаллизацией извлекают смесь солей NaCl и KCl, которые реализуют в качестве сварочного и металлургического флюса.

Твердый остаток выщелачивания состоит в основном из оксидов железа и ферритов цинка. Его высушивают, окомковывают с углем и плавят в электродуговой печи. Оксиды железа при плавке восстанавливаются, образуя металлическую фазу, ферриты цинка диссоциируют, цинк испаряется и после окисления в газовой фазе улавливается в системе пылеочистки. Уловленная пыль возвращается в голову процесса (на выщелачивание).

Вместе с тем гидрометаллургическая переработка пылей и шламов не получила широкого промышленного распространения. Серьезным препятствием к этому является их многоступенчатость, необходимость стадий обезвоживания и регенерации отработанных растворов при наметившейся тенденции последних лет на использование сухих методов пылеочистки в основных металлургических переделах.

Расчеты показывают, в частности, что применительно к пылям электросталеплавильных печей наиболее экономически эффективной является переработка высокоцинковистой так называемой «оксидной

смеси» шламов следующего усредненного состава, %: 54-73 Zn; 1-11 Pb; 2,3-6,9 Fe (*Southwick*).

3.4. Окускование

Окускование шламов с использованием полученного продукта для выплавки чугуна, стали или сплавов является во многих случаях эффективным способом утилизации. При этом используют все известные методы (обжиговые и безобжиговые).

3.4.1. Обжиговые методы

Обжиговые варианты окускования включают агломерацию шихт или производство обожженных окатышей. Наибольшее распространение они получили при подготовке шихт к доменной плавке. Оба этих метода предусматривают термообработку шихты (железородные концентраты, известняк и другие компоненты) при температурах обычно 1250-1350°C при несколько больших их значениях для агломерации. В агломерацию поступает неокомкованная или слабоокомкованная шихта, которую нагревают до температуры частичного расплавления с последующей разгрузкой спека. Обжигу подвергают шихту, окомкованную до диаметра кусочков 8-20 мм (окатыши), которые упрочняют термообработкой, но не доводят шихту до частичного расплавления.

3.4.1.1. Агломерация

Добавка железосодержащих шламов в аглошихту является в настоящее время основным способом их утилизации. Обычно его используют применительно к шламам доменного производства и агломерационным, но таким же образом в некоторых случаях утилизируют сталеплавильные шламы.

Исследования, проведенные на шламах различных металлургических предприятий России, показали, что их добавка в определенных пределах при правильной подготовке не ухудшает показатели процесса спекания и качества агломерата.

Выявлено, что ввод шлама в аглошихту в виде сыпучей мелкозернистой массы в количестве до 190 кг/т не уменьшает производительности аглоустановки, оставляя качество агломерата на постоянном уровне. Использование неподготовленных шламов в количестве свыше 120 кг/т без изменения технологии агломерации приводит к снижению производительности аглоустановки и качества агломерата.

Эти наблюдения подтверждает практика НЛМК. В течение 2001-2002 гг. на комбинате в аглошихту было подано около 450 тыс. т железосодержащих отходов, в том числе, тыс. т: шламов агломерации — 220; доменных пылей и шламов — 140; конвертерных шламов — до 30; окалины печной и металлургической — 60. Попутно утилизировано также 100 тыс. т пыли обжига известняка и доломита (Дорошев). Доля железосодержащих отходов в аглошихте достигала 35%. Твердое топливо в нее не вводили, так как достаточное количество углерода имелось в пылях. Концентрация цинка в шихте составляла 0,1-0,25. «Шламовый» агломерат проплавления в доменной печи объемом 1000 м³. Для снижения вредного влияния цинка применяли технологию регламентированных перерывов в проплаве, способствующих его выводу из печи (Производственный...). Плавки показали, что при увеличении цинка с 200 до 1700 г/т чугуна приведенный расход кокса увеличился с 475 до 495 кг, производительность печи снизилась с 1850 до 1650 т/сут, содержание цинка в доменном шламе возросло с 7 до 15%.

В некоторых случаях шламы вводятся в аглошихту в виде суспензии, в том числе и распыляемой через форсунки.

На заводе «Юзинор» (Франция) шламы доменного и конвертерного производства непосредственно из сгустителей подают в смесительный барабан в количестве, обеспечивающем заданное увлажнение аглошихты. Затем окомкованная шихта поступает в распределительно-питательное устройство агломашины.

На аглофабриках ФРГ конвертерный шлак непосредственно в виде густой пульпы (300-700 г/л) после радиальных сгустителей или гидроциклонов распыляют в смесительный барабан шихты. Аналогичный процесс освоен на аглофабриках СНГ. Достоинство такого способа — низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы. При этом необходимым условием успешной работы является надежная автоматическая дозировка шлама в смесительный барабан в зависимости от влажности шихты и плотности подаваемой пульпы.

3.4.1.2. Обожженные и металлизированные окатыши и брикеты

В общем случае возможно использование отходов в качестве добавок в шихту при производстве окатышей из железорудного концентрата или как основного компонента для получения окускованного продукта.

Первый вариант, как правило, приводит к снижению производительности обжиговых машин из-за увеличения продолжительности нахождения окатышей в зоне сушки. Кроме того, обычно пыли и шламы

содержат значительное, но непостоянное, количество углерода, что дестабилизирует режим высокотемпературного обжига окатышей. Поэтому преимущественное распространение получил второй вариант. Его чаще всего реализуют или на ленточной обжиговой машине или во вращающейся печи.

Обжиг на ленточной (конвейерной) машине, являющейся основным агрегатом для производства окатышей в России и странах СНГ, применительно к получению литейного или передельного чугуна из отходов металлургического производства (пыль, шлак, окалина) был предложен и опробован в опытно-промышленных условиях в США. Этот способ испытан на установке производительностью 5 т/сут (по исходному сырью). Испытания проводили в течение 30 дней. Сырые материалы после дробления и смешения окомковывали в чашевом грануляторе. Полученные окатыши подвергали обжигу и частичному восстановлению с одновременным удалением вредных примесей, а затем с температурой 980°C непрерывно загружали в электродуговую печь для окончательного восстановления и плавления с образованием чугуна и шлака. Чугун из печи периодически выпускали и разливали в чушки или транспортировали в сталеплавильный цех для дальнейшего передела. На производство 1 т чугуна расходовали 2-2,7 т отходов, 0,1-0,3 т флюса, 2,3-4,5 кг электродов и 700-1100 кВт·ч электроэнергии. Преимуществами этого способа являются простота, возможность использования бедных железосодержащих материалов и дешевого недефицитного топлива, низкие капитальные и эксплуатационные затраты.

Технология производства окатышей во вращающейся печи опробована фирмой «Дофаско» (США). На заводе этой фирмы в Гамильтоне (Канада) скопилось значительное количество шламов доменного, мартеновского и прокатного производств. Их текущий ежесуточный выход составляет 800 т, из которых 10% приходится на сухую колошниковую пыль, по 25 — на шламы, образующиеся после очистки доменного газа и газов сталеплавильных печей, 10 — на крупную мартеновскую пыль, 27 — на прокатную окалину и 3 — на осадок после травления металла. Смесь отходов содержит, %: 50 Fe_{общ}; 4,1 Fe_{мет}; 40 Fe₂O₃; 12,6 C; 0,45 ZnO; 0,21 S. Их утилизация затруднена из-за колебания влажности от 10 до 25% и сильного загрязнения маслами и каменноугольной смолой.

В полупромышленных масштабах поступающие со склада отходы подсушивали во вращающейся трубчатой печи, после чего отсеивали фракцию более 6,35 мм. Фракцию менее 6,35 мм смешивали с бентонитом (2%) и окомковывали. Окомкованный материал подавали в шахтный подогреватель и из него во вращающуюся печь, работающую

на коксовом газе. При термообработке окатышей углерод взаимодействовал с окислами железа и цинка с образованием $Fe_{мет}$, паров цинка и CO . Последний дожигали над слоем при подаче вторичного воздуха. Пары цинка с горячими отходящими газами поступали в шахтный подогреватель, в котором цинк окислялся и, в отсутствие газоочистки, выбрасывался через трубу в виде белого дыма.

Восстановленный продукт содержал, %: 70 $Fe_{общ}$; 56 $Fe_{мет}$; 0,075 ZnO ; 0,26 S; 25,7 пустой породы. Выход фракции менее 6,35 мм был ниже 3%, пылеунос — 1,5% от массы шихты. Проведенные опыты послужили основанием для проектирования фирмой «Дофаско» установки производительностью 1500 т/сут отходов.

Известны также попытки утилизации отходов электропечей, принятые в США. Их окомковывали с коксовой пылью и проводили термическую обработку в восстановительной атмосфере при 1230°C. При этом происходят восстановление и испарение цинка окатышей, его удаление с отходящими газами. Очистка последних позволяет получить цинк как товарную продукцию.

На Орско-Халиловском металлургическом комбинате разработана и опробована технология получения во вращающейся печи окускованного материала из смеси шламов газоочисток доменных и мартеновских печей, который пригоден для использования в доменной шихте. Основным агрегатом является обжиговая печь длиной 18 м с противоточным движением газов. Исходный материал с влажностью 30-70% поступает в него через разбрызгивающие форсунки. Температура материала в зоне спекания составляет 980-1000°C, на разгрузочном участке — 600-700°C, температура отходящих газов 300-380°C. При работе печи наблюдается повышенный вынос пыли (до 20%), которая улавливается и возвращается на спекание.

После спекания получают куски, которые содержат около 70% кл. +10 мм и 5% кл. -5 мм. Доля углерода снижается с 10,8% в шламе до 0,32% в спеченном продукте.

Определенное распространение получили способы утилизации пылей и шламов методом брикетирования. Одно из первых таких предприятий производительностью 200 т брикетов в сутки работает в ФРГ с начала 50-х гг. 20 в. Шихта для брикетирования состоит из ~50% колошниковой пыли, 40% других железосодержащих отходов и 10% связующих (щелоков 50%-й концентрации). Окускование ведут в вальцевых прессах производительностью 10-15 т/ч, брикеты упрочняют обжигом при 600-900°C в атмосфере с соотношением CO и CO_2 , равным 3. Обожженный продукт обладает высоким (более 25 кН/см²) сопротивлением сжатию и используется для выплавки чугуна.

В некоторых случаях экономически эффективными оказались процессы горячего брикетирования различных железосодержащих отходов и мелких руд. Первые установки, разработанные фирмой «Юнайтэд Стэйтс Стил» совместно с другими компаниями, появились в США в конце 40-х гг. прошлого столетия. Их производительность составляет 30 и более т/ч. Рассматриваемая технология заключается в нагреве сырья до 800-1000°C и брикетировании его в пластичном состоянии в вальцовых прессах закрытого типа. Нагрев шихты, состоящей из доменной пыли, прокатной окалины и тонкоизмельченного металлического лома, осуществляют в печах кипящего слоя. В состав шихты может быть введен уголь. Это снижает температуру ее нагрева до пластичного состояния перед брикетированием. По данной технологии работают промышленные установки фирмы «Дофаско».

Перспективным направлением утилизации пылей и шламов является металлизация полученных на их основе окатышей. С этой целью разработано несколько промышленных процессов. Общим для них является не только использование в качестве агрегата для металлизации вращающейся трубчатой печи, но и введение в шихту восстановителя. Отличаются они в основном технологией подготовки шихтовых материалов, а также наличием или отсутствием колосниковой решетки для предварительного нагрева и упрочнения окатышей. Металлизированные окатыши из отходов доменного производства применяют только в шихте доменных печей, так как для выплавки стали они не пригодны из-за высокого содержания серы и пустой породы.

Один из способов металлизации, разработанный в ФРГ, осуществляют следующим образом. Шлам влажностью 13% подвергают первичному измельчению с одновременной подсушкой до влажности 2%, затем — сухому измельчению и окомковывают. Окатыши в смеси с твердым восстановителем (бой бурогоугольных брикетов) загружают во вращающуюся печь, в которой происходит их восстановление при 1050°C. Выгруженный из печи материал поступает в трубчатый охладитель, затем подвергается рассеву и магнитной сепарации. Окатыши содержат 70% Fe при степени металлизации 92-94%. При термообработке обеспечивается высокий уровень удаления цинка, свинца и щелочных металлов. Уловленные возгоны, суммарно содержащие около 45% Zn и Pb, используют для получения этих металлов (Борисов...).

Аналогичные способы металлизации окатышей применяют на других заводах Германии, в США и Японии при степени удаления цинка и свинца до 99%, оксидов натрия и калия 60-85%.

В сталеплавильных отходах содержание пустой породы существенно ниже, чем в доменных, поэтому полученные окатыши могут быть использованы при производстве стали.

В последние годы при металлзации брикетов и окатышей получили распространение печи с вращающимся подом (ПВП): технологии фирм «Metals recycling» и «Inmetco», процессы «Dryiron», «Fastmet» и др.

Фирма «Metals recycling» получает брикеты из пыли электродуговых печей, смешанных с другими металлсодержащими отходами и углем. Брикеты направляют в печь с вращающимся подом (температура $\sim 1288^{\circ}\text{C}$). В нем цинк возгоняется, продукты его окисления в газовой фазе улавливаются в рукавных фильтрах и отправляются потребителям. Обесцинкованные брикеты загружаются в электропечь (Установка...).

Применяемая с 60-х гг. 20 в. технология «Инметко» отличается чрезвычайным разнообразием компонентов исходного сырья: пыли и шламы доменного, конвертерного и электросталеплавильного переделов, аглофабрики, прокатная окалина, шлифовальная пыль, пыль мешочных фильтров, отработанные травильные растворы, фильтраты с никелем и хромом гальванических участков, отработанные хромитовые и углеродистые огнеупоры из травильных ванн, использованные катализаторы и батарейки.

Схема производства включает измельчение и дозирование исходных материалов, смешивание их с восстановителем (уголь, кокс, нефтекокс) и связкой (частично — из отходов), окомкование в тарельчатом грануляторе (диам. 4,3 м) до ~ 12 мм, восстановление окатышей в печах с вращающимся подом (диам. 16,7 м), в которых сжигается газ. Степень металлзации окатышей за 12-18 мин пребывания в печи достигает 92%. Возгоны цветных металлов улавливаются в системе сухой или мокрой газоочистки. Восстановленные окатыши переплавляют в дуговой печи мощностью 6 МВА с погруженными в шлак электродами. Состав металла, %: 8 Ni; 13,5 Cr; 70 Fe; 1,8 Mn; 0,9 Mo; 0,7 Cu; 0,4 Co; 0,2 S; 3,6 C. Извлечение металлов составляет 92-98%, за исключением Cr (86%) и Mn (60%).

Технологические модули «Инметко» производительностью 10-50 тыс. т/год по отходам могут быть адаптированы к особенностям каждого предприятия.

Процесс «Dryiron» разработан фирмой «Mautee Research and Engineering». Отходы в смеси с углем или коксовой мелочью *брикетируют* и подвергают высокотемпературному ($1150-1300^{\circ}\text{C}$) нагреву в ПВП. Показатели процесса: степень металлзации оксидов железа свыше 90%, удаление цинка и свинца 95-99%, щелочей более 50%, хлоридов не менее 90%. Способ используется на американских заводах «Ameristeel» и «Rouge Steel», в японской фирме «Nippon Steel Corporation». В «Rouge Steel» мощность цеха составляет по отходам 300 тыс. т/год, он производит около 200 тыс. брикетов со степенью металлзации примерно 90% (расход коксовой мелочи 50 тыс. т/год).

Брикеты используют при выплавке стали. Цинковый концентрат содержит более 70% Zn (61-я...).

Японская фирма «Kobe Steel» переориентировала «Fastmet-процесс» восстановления рудоугольных брикетов во вращающейся трубчатой печи в установку ПВП производительностью 190 тыс. т/год для металлизации *окатышей* по технологии «Dryiron» из пылей доменного и сталеплавильных переделов. Получаемое губчатое железо используют в сталеплавильном производстве (Kobe...).

3.4.2. Безобжиговое упрочнение

В настоящее время становится очевидным, что ресурсосбережение — решающий источник удовлетворения прироста потребностей народного хозяйства в топливе, энергии, сырье и материалах. В связи с этим в рудоподготовке возрастает интерес к так называемым безобжиговым (низкотемпературным) способам окускования металлургических шихт, построенным на иной, чем высокотемпературные, научной основе. Безобжиговое окускование предусматривает введение в шихту вяжущих или использование в этом качестве отдельных составляющих шихты, обладающих вяжущими свойствами, поэтому все безобжиговые технологии можно разделить на использующие вяжущие и не применяющие их (Лотош... Безобжиговое...).

3.4.2.1. Технологии с применением вяжущих

Технологии с применением вяжущих делятся на способы нормального, автоклавного, ускоренного твердения, сушки и карбонизации. Вслед за Н.Ф.Федоровым автор полагает, что вяжущие вещества — это композиции на основе гетерогенных дисперсных систем типа твердое — жидкое (газ), компоненты которых вступают в физико-химическое взаимодействие друг с другом, образуя пластичную удобообрабатываемую массу, превращающуюся при определенных условиях в прочное камневидное тело. Эта формулировка в равной степени подчеркивает многообразие и существенное значение как твердой, так и жидкой (газообразной) фазы, входящих в состав вяжущих композиций. Наибольшее применение получили вяжущие на основе коллоидно-дисперсных систем (цементы). В цементах дисперсионная среда представлена водой или водными растворами солей, кислот и гидроксидов, а дисперсная фаза состоит из солей и оксидов различных соединений или металлов. При безобжиговом окусковании наибольшее распространение имеют вяжущие гидравлического твердения. В них дисперсион-

ная среда представлена водой, а дисперсная фаза — солью. Последняя обычно и называется цементом. Наилучшие условия для твердения гидравлических цементных связок создаются при их нахождении в воздушно-влажной среде.

Наиболее часто методы безобжигового упрочнения разрабатывают применительно к производству окатышей.

В Японии на заводе в Нагоя (1978 г.) введена в эксплуатацию установка производительностью 550 тыс. т/год окатышей из пылей доменного производства, используемых в доменной плавке. На заводе в Оита с 1979 г. работает установка производительностью 120 тыс. т/год окатышей из шламов конвертерного производства. В обоих случаях используется портландцементная связка, а упрочнение ведут на открытых складах в штабелях в течение нескольких недель. Аналогична установке Оита установка в Кимицу.

Применительно к пылям и шламам доменного и сталеплавильного переделов технологии упрочнения безобжиговых окатышей *при нормальных температурах* разрабатывались автором в 1974-1992 гг. для окускования отходов Челябинского, Кузнецкого и Нижнетагильского металлургических комбинатов. В исследованиях по ЧМК использовали рудную часть, состоящую из смеси шламов мартеновских и конвертерных производств следующего состава, %: 42,2 Fe; 5,66 FeO; 56,6 Fe₂O₃; 7,14 CaO; 3,50 MgO; 10,2 SiO₂; 3,96 Al₂O₃; 6,70 C.

Прочность окатышей диаметром 15 мм при расходе 10% измельченного портландцементного клинкера и продолжительности упрочнения 28 сут достигала 80 даН/окат. Такая же прочность получена при использовании комбинированного вяжущего из смеси ПЦК и каустического магнезита. Металлургическая оценка показала, что оно обеспечивает механическую прочность окатышей и прочность при восстановлении, достаточные для плавки окускованного материала в доменной печи.

Прочность окатышей при использовании в качестве вяжущего 8-20% извести и известково-доломитной пыли составляла порядка 20 даН. Добавки 4% нитратов натрия и кальция, сернокислого натрия, хлористого и фтористого кальция, хлорида аммония позволили повысить прочность до 30-50 даН. Такие же результаты получены с применением вяжущих на основе доменных шлаков и извести, цемента Сорреля. Термическая стойкость окатышей на известковой связке не позволяет использовать их в шихте доменных печей, однако они пригодны для сталеплавильного производства, особенно с добавками хлоридов. Последние являются хорошими десульфураторами, удаляющими серу окатышей практически на 100% уже при температурах 500-600°С.

Результаты, аналогичные рассмотренным, получены также при окомковании мартовских пылей НТМК и КМК.

Автоклавная обработка безобжиговых окатышей из смеси прокатной окалины, колошниковой пыли доменных печей, конвертерных шламов и коксовой мелочи использована в известной технологии Мичиганского технологического университета (США). В соответствии с ней перечисленные выше исходные компоненты шихты измельчают, смешивают с 5% извести и 1% кремнеземистой тонкодисперсной добавки, выполняющими роль связующего при автоклавной обработке, смесь выдерживают в бункерах до гашения извести, содержащейся в доменных и сталеплавильных пылях, затем окомковывают. Окатыши подсушивают в вертикальных сушилках и автоклавируют 1 ч при давлении пара 21 атм (Mathias...).

Из смеси, содержащей 42% прокатной окалины, 28% колошниковой пыли и шлама доменных печей, 23% сталеплавильных пылей, получали окатыши с содержанием 55% Fe и 5% С, которые при диаметре 19 мм имели прочность на сжатие 350 кг, а при испытаниях металлургических свойств в установке Линдера показали отличные результаты: степень восстановления 67,7%, истирание (фракция -1,41 мм) всего 2,5%. Окатыши при их доле в шихте 5-12% проплавлялись в электродуговых печах.

По этой же технологии произведены рудо-угольные окатыши (13,2-16,2% С и порядка 0,1% S). В качестве связующего использовано 7% извести и 3% кремнеземистой добавки. Окатыши при их доле в шихте 50-100% плавил в вагранках на чугун (Goksel...).

Известны также технологии упрочняющей *сушки*. Она была применена к окатышам, изготовленным из шихты, содержащей конвертерную и мартовскую пыли. Их смешивали с водным раствором гидроксида щелочного или щелочно-земельного металла, используемого в качестве вяжущего. Смесь окомковывали, окатыши сушили при 100-200°C и перерабатывали в сталеплавильном переделе (Pat. 50-25881, Japan).

Более ранний патент предусматривает подсушку окатышей, полученных со связующими, при температуре не более 90°C до влажности 1,0% перед их плавкой в электрических печах. Необходимость подсушки, очевидно, связана с опасностью выброса металла из печи при загрузке окатышей с большей влажностью (Pat. 697173, Canada).

Способ изготовления безобжиговых окатышей, упрочняемых сушкой, разработало Горное бюро металлургического центра США применительно к утилизации пылей, улавливаемых в тканевых фильтрах электросталеплавильных печей, отходов шлифования и окалины, с до-

бавкой коксовой мелочи и цемента. Окатыши получали во вращающейся печи, затем сушили и проплавлили в электропечах.

В этом способе обращает внимание совершенно неэффективное использование портландцемента, гидравлически твердеющего вяжущего, для упрочнения окатышей сушкой. Однако и в данном случае получены удовлетворительные результаты плавки, в частности в дуговой печи емкостью 12,5 т на заводе фирмы «Лослин стэйнлиз стил». Окатыши (диам. 12,5-25 мм) изготовляли из шихты, содержащей, %: 40 отходов шлифования, по 17 окалины и пыли электропечей, 12 пыли установок АОД, 10 коксовой мелочи и 4 цемента. Химический состав окатышей, %: 41,8 Fe; 9,5 Cr; 3,96 Ni; 2 Mn; 1 Mo. В шихту вводили небольшое количество лома нержавеющей стали, а во время плавки добавляли ферросилиций. Полученный металл имел состав, %: 76,7 Fe; 11,8 Cr; 6,5 Ni; 0,9 Mn; 4,3 Si; 3,2 C. Извлечение железа составляло 86,1%, хрома 68,7 и никеля 92%. В дальнейшем в печи емкостью 17,5 т были проведены плавки с получением нержавеющей стали из шихты, содержащей 2,7 т окатышей, а также из шихты, в состав которой входило 3,6 т слитков, выплавленных из этих окатышей. Показатели плавки не отличались от обычных. Разработанный метод позволяет полностью использовать металлосодержащие отходы, образующиеся при производстве нержавеющей стали.

Рассмотренные методы упрочнения безобжиговых окатышей (нормальное твердение, автоклавная обработка, сушка) обладают рядом недостатков.

Так, твердение при нормальных температурах требует специальных мер по предотвращению слипания брикетов и окатышей при длительном вылеживании в слое более 0,5 м. Значительна также продолжительность упрочнения (до 4-х недель).

Основной недостаток автоклавного метода заключается в его периодичности, что существенно усложняет организацию производства, увеличивает капитальные затраты на строительство зданий. Высокое избыточное давление пара требует повышенной квалификации обслуживающего персонала и соблюдения специальных мер по технике безопасности для оборудования, работающего под давлением. Результаты упрочнения сильно зависят от химического и минералогического состава рудной части и качества вяжущего.

Для процессов сушки отсутствуют достаточно эффективные вяжущие (высокопрочные, термостойкие и относительно дешевые), а использование гидратационнотвердеющих портландцемента и извести при сушке нецелесообразно.

Недостатки перечисленных способов устранены в *методе ускоренного твердения* — новом процессе безобжигового окускования, разра-

ботанном автором. В его основе лежит обработка изделий в среде с переменной влажностью. Сущность метода составляют:

- 1) впервые привлеченные в рудоподготовку представления о механической активации шихты перед окомкованием;
- 2) выполнение процесса гидратационного упрочнения в среде со 100%-й или близкой к ней влажностью при температурах, верхний предел которых не превышает 100°C;
- 3) установленный автором эффект послегидратационного доупрочнения образцов (при сушке).

Достижимый при этом результат заметно превосходит гипотетический суммарный, которого можно было бы достичь сложением эффектов, полученных при индивидуальном выполнении каждой из стадий ускоренного твердения, без совокупности остальных.

Основной стадией упрочнения при ускоренном твердении является тепловлажностная обработка, осуществляемая при 70-100°C и 100%-й или близкой к ней относительной влажности (*пропарка*). При этом за 2-8 ч достигается одно-двухнедельная прочность образцов нормально-го твердения, т.е. ускорение процессов структурообразования составляет 120-170 раз.

Пропарка принципиально отличается от автоклавного метода тем, что осуществляется при нормальном давлении, поскольку ее температуры не превышают 100°C. Это позволяет создать непрерывный процесс упрочнения.

Сырые окатыши могут поступать на тепловлажностную обработку сразу или спустя некоторое время после изготовления (после предварительной выдержки). Предварительная одно-двухчасовая выдержка на воздухе или в воздушно-влажной среде, повышая прочность окатышей, позволяет избежать их деструкции при нагревании.

Прочность окатышей при тепловлажностной обработке через некоторое время достигает постоянных значений, и ее повышают последующей сушкой — естественной, обычно при температурах 15-25°C в течение нескольких суток, или с подогревом. Продолжительность последней, в зависимости от температуры, обычно 200-300°C, минералогического состава рудной части и связки может изменяться от нескольких минут до нескольких часов. В результате окатыши ускоренного твердения достигают месячной прочности образцов нормально-го твердения, а часто и превышают ее, т.е. продолжительность упрочнения в отдельных случаях сокращается в несколько сотен раз.

Технологии ускоренного твердения безобжиговых окатышей применительно к пылям и шламам ЧМК и НТМК разработаны одновременно с технологиями их упрочнения при нормальных температурах. Используя те же составы шихт и вяжущих, опыты по ускоренному и

нормальному твердению вели параллельно. На основе полученных данных институт «Челябгипромет» выполнил технико-экономическое обоснование (ТЭО) окомкования пылей и шламов ЧМК в количестве 1 млн т/год. Были предусмотрены две схемы производства окатышей: для доменной плавки и для сталеплавильных агрегатов.

Окатыши для доменного и сталеплавильного переделов в основном отличались видом вяжущего. Для первого использовали термостойкую связку на основе портландцемента и каустического магнезита. Для сталеплавильных окатышей применили смесь гашеной извести и ускорителей твердения, например хлористого кальция. ТЭО намечало строительство двух основных узлов окомкования с получением в отдельных цехах 745 тыс.т доменных окатышей и 260 тыс. т — сталеплавильных. Расчетный экономический эффект в текущих ценах 1979 г. составил 6,3 млн руб./год при величине капитальных затрат 24,3 млн руб. и сроке их окупаемости 3,9 г.

Определенное развитие метод ускоренного твердения получил в работах и других, в том числе зарубежных, исследователей. В частности, он проверен применительно к окомкованию сталеплавильных шламов Западно-Сибирского (ЗСМК) и Кузнецкого металлургических комбинатов (Ливенец...). Как следствие, была предложена технология производства окатышей из конвертерных шламов ЗСМК, только сгущенных в отстойниках (без дополнительной фильтрации). Водоотнимающим средством, одновременно играющим роль минерального вяжущего, послужила пыль известкового производства, содержащая 85% CaO и 5% ПМПП. Оптимальное соотношение твердого вещества шлама и извести составило 1:2 по массе при влажности исходного шлама 60-75%. Оказалось также возможным без ухудшения качества окатышей вводить в смесь конвертерного шлама и извести втрое большее количество сухой электросталеплавильной пыли КМК. Пропаренные в течение 3 ч окатыши имели прочность на сжатие до 60 даН/окатыш.

Исключение стадий фильтрации и сушки шламов позволяет существенно упростить и удешевить процесс их окомкования.

В промышленном масштабе метод ускоренного твердения внедрен в Японии (технология НКК Корака фирмы «Ниппон Кокан») для окускования марганцевой рудной мелочи с последующей электроплавкой; опробован в опытно-промышленных условиях другой японской фирмой («Сумитомо киндзоку коге») и в США. Японские специалисты оценили технологию ускоренного твердения как наиболее перспективную из безобжиговых методов окускования (Такахаша...).

Метод *карбонизационного упрочнения* предусматривает твердение безобжиговых окатышей на основе вяжущей композиции типа твердое-

газ (Авт.: Классификация...). В этом методе связка (кальцит) образуется при взаимодействии гидрата оксида кальция и углекислого газа.

Сведения об использовании этого метода для окискования железосодержащих отходов немногочисленны.

В частности, на заводе Кунминг (Китай) построена установка карбонизированных окатышей из пыли конвертеров, имеющая производительность 45 т/сут (Longhua).

На Украине получена партия окатышей из шлама карты отстойника Днепропетровского металлургического завода. Состав окатышей, %: 36,7 Fe; 17,5 CaO; 8,45 SiO₂; 0,39 S; 8,9 C. Карбонизацию провели в противоточном шахтном агрегате, в котором использовали отходящие конвертерные газы, содержащие 20-27% CO₂, при их температуре 200°C. В качестве вяжущего применили 15% смеси, состоящей из доменного шлака и извести, взятых в соотношении 2:1. Окатыши содержали 80% кл. 8-12 мм и 20% более крупных, имели прочность на сжатие 150-190 даН/окат., пористость 33-34%, насыпную массу 2,23 т/м³, восстановимость 73-77%. Их подавали порциями в 0,75 т в завалку конвертера перед заливкой 55 т чугуна. Введение окатышей обеспечило степень десульфурации стали, равную 24%, дефосфорацию 99,9% при коэффициенте распределения серы между шлаком и металлом около 6,3. Автор сообщения считает, что разработанная технология является модулем для металлургического завода и может быть рекомендована для распространения на предприятиях с полным металлургическим циклом (Бобылев).

Наряду с производством безобжиговых окатышей некоторое распространение получили методы брикетирования.

В Японии разработана технология брикетирования отходов сталеплавильного производства. В соответствии с нею кек после фильтр-прессов смешивают с пылью из систем газоочистки и брикетируют со связующими на вальцевых прессах. Сырые брикеты подсушивают и упрочняют на агрегатах конвейерного типа. Для повышения прочности кусков в шихту вводят до 30% крупной прокатной окалины. Готовые брикеты используют в шихте электропечей (Комплексное..., Равич...).

Аналогичную технологию на установке производительностью 40 т/ч применяют на комбинате фирмы «Айрленд стил». Смесь шлака, окалины, отходов доменного передела, сталеплавильного цеха и осадков сточных вод обезвоживают на центрифугах и сушкой в горизонтальной печи, смешивают со связующими (цемент, известь, мелас-са) и брикетируют при давлении ~10 МПа (Production...).

Фирма «Аугуст Тиссен-Хютте» (Германия) предложила и реализовала в промышленном масштабе брикетирование железосодержащих отходов (колошниковая, конвертерная пыль и др.) в смеси с угольной

пылью и связующими. Если эти отходы содержат незначительные количества цинка, свинца и щелочей, то брикеты используют в металлургическом переделе взамен обычного железосодержащего сырья (*Комплексное...* 1988).

В нашей стране НЛМК опробовал плавку партии брикетов (2500 т) из конвертерных шламов (65%), коксовой мелочи (20) и портландцемента М500 (15%). Они содержали, %: 35,1 Fe; 46,4 оксидов железа; 19,9 CaO; 7,1 SiO₂; 19 C; 1,5 ZnO. Десятидневные плавки в доменной печи объемом 1000 м³ при среднем расходе брикетов 121 кг/т чугуна выявила снижение производительности (на 5%), кокса (с 508,7 до 485,5 кг/т) и серы в чугуне (с 0,018 до 0,015%). Коэффициент замены коксовой мелочью кокса доменной печи составил 100% (*Производственный...*). Обращает внимание высокий расход портландцемента, обусловленный, по-видимому, неэффективными технологическими решениями, в частности на стадиях подготовки шихты и неконтролируемого упрочнения брикетов.

Похожая технология внедрена в 1995 г. применительно к переработке пыли производства нержавеющей стали и феррохрома. Установка производительностью 65 тыс. т/год по пыли построена на бывшем заводе «Chroeuore» в Дюнкерке (Франция). Технологическая схема предусматривает смешение пыли с углем, кварцем и связующим, брикетирование шихты, плавку брикетов в электропечи. Основным ее продуктом является хромо-никелевый сплав, составляющий 45% от массы пыли. Возгоны цинка и свинца перерабатывают в цветной металлургии, шлаки утилизируют в строительстве (Bus...).

Во Франции разработана и используется технология брикетирования с применением органической связки. В соответствии с нею, пыль (шламы) сушат до необходимой влажности (обычно не более 2%) во вращающихся печах или печах кипящего слоя и при температуре 130-150°C вводят в смеситель, где расплывается жидкий битум (~180°C). Шихту охлаждают примерно до 90°C и брикетируют на вальцевом прессе, брикеты используют в конвертерах (около 3% от массы шихты).

Фирма «Мидрэк» разработала промышленную технологию брикетирования металлизированной мелочи и пыли с комбинированным связующим. Его состав, %: 3-5 смола, 30-35 гашеная известь, 15-20 жидкое натриевое стекло, 50 вода. Первая крупная промышленная установка работает по данному способу с 1975 г. на металлургическом заводе в Джорджтауне (США). Физические и химические свойства брикетов приближаются к компактному металлу. Окускованный материал используют в различных металлургических агрегатах.

3.4.2.2. Окускование без связующих

Известны сообщения, что в отдельных случаях пыли и шламы мартеновского и электросталеплавильного производств окусковывают без связующих. Естественно, что это резко снижает качество получаемого продукта. Однако в тех случаях, когда его без перевадок подают от узла окускования к металлургическому агрегату, такой способ подготовки отходов может найти применение, хотя и ограниченное.

На металлургическом заводе «Спарроуз-Пойнт» фирмы «Бэтликхэм Стил» (США) сырые окатыши получают из пыли и шламов мартеновских печей и кислородных конвертеров. Исходные материалы смешивают в сгустителе, из сухой мартеновской пыли предварительно выщелачивают серу, после чего ее содержание не превышает 0,06%. Сгущенную шламовую смесь сушат отходящими газами с температурой 260°C в распылительной сушилке. После сушки шлам измельчают для повышения его удельной поверхности и окомковывают в чашевом грануляторе, добавляя воду. Окатыши крупностью 19-25 мм выдерживают на воздухе в течение 1-8 ч, при этом они приобретают прочность на сжатие, равную 125 Н. Она позволяет транспортировать окатыши к месту загрузки с минимальными разрушениями. Используют их в основной шихте кислородного конвертера в качестве охладителя или в мартеновской печи.

Технология фирмы «Эско» (США), с 1979 г. использовавшаяся на опытной установке производительностью 2 т/ч, предусматривает окомкование без связующего пыли электродуговых печей, последующую подсушку окатышей и возвращение их в плавку (Мещерякова...).

Близкий к технологии фирмы «Эско» процесс применяют в Японии, однако в шихту окомкования вводят порошкообразный кокс. В условиях ДСП цинк из углеродсодержащей шихты возгоняется и улавливается в рукавном фильтре, образуя пыль с концентрацией около 75% ZnO. Ее направляют для извлечения цинка. Отмечается, что более 99% диоксинов исходной пыли при высокотемпературной обработке разрушается.

На ряде предприятий шламы без предварительной обработки гранулируют, обычно в барабанных окомкователях, и затем используют как компонент агломерационной шихты.

Фирмой «Хутт» (ФРГ) разработан процесс брикетирования пылей, образующихся при восстановлении железо-никелевых руд во вращающихся печах. Сухие и мокрые пыли процесса восстановления, содержащие до 30% С, и сухая пыль электрофильтров дробильно-сортировочного цеха с добавлением 7% воды брикетируются в вальцевых прессах высокого давления. Производительность установки —

30 т/ч брикетов. Окускованный материал возвращают в шихту восстановительных печей.

3.4.3. Сравнение различных способов окускования

Из изложенного ранее следует, что традиционным методом утилизации высокодисперсных отходов металлургического производства до недавнего времени являлась агломерация. Однако такие отходы ухудшают ее показатели. Чтобы избежать этого, требуется дополнительная подготовка пылей и шламов, прежде всего окомкование.

Введение пылей и шламов в шихту для обожженных окатышей резко снижает их прочность на сжатие.

Более эффективно окускование тонкодисперсных отходов безобжиговыми способами. Использование в Японии метода ускоренного твердения (технология НКК Корака) выявило, что расход электроэнергии составляет $1/3-1/4$ от имеющегося при агломерации и обжиге. Тепловые затраты равны 336 МДж/т продукта, а с учетом производства вяжущих — 588 МДж/т, т.е. около половины потребляемого при агломерации (Производство...).

К аналогичным выводам приводит сравнение энергетических затрат при производстве безобжиговых автоклавированных и обожженных окатышей (Лотош... Энергетические...).

Автором выполнен также общий энергетический анализ процессов безобжигового и обжигового окускования, основанный на расчете сквозных затрат энергии — технологических топливных чисел (ТТЧ) — на всех предшествующих и в рассматриваемом переделах за вычетом вторичных ресурсов, в килограммах условного топлива (к.у.т.) на единицу продукции. Он подтвердил высокую конкурентоспособность безобжигового упрочнения по отношению к традиционным способам. Для агломерации, окатышей обожженных и ускоренного твердения ТТЧ составили соответственно 157,2; 114,2 и 65,9 к.у.т./т (Авт.: Технологические...)

Еще более существенна разница в ТТЧ, подсчитанных без учета расхода энергии на рудную часть, т.е. прямо отражающих затраты процессов окускования. В этом случае для агломерации, обжига и безобжигового окускования ТТЧ составляют соответственно 121,8; 78,8 и 30,5 к.у.т./т. Таким образом, энергозатраты безобжигового окускования в 2,5-4,0 раза ниже, чем в высокотемпературных методах, и минимум во столько же оно более экологически чисто (повышающий коэффициент обусловлен отсутствием на всех стадиях безобжигового

окускования образования монооксида углерода, оксидов азота, сернистого газа и незначительными масштабами пылевыноса).

Приведенные расчеты выполнены применительно к крупнотоннажному производству порядка 8 млн т/год окускованного сырья. Однако эффективность безобжигового окускования относительно возрастает при переходе на установки небольшой единичной мощности, которые представляются наиболее вероятными при утилизации пылей и шламов. Расход топлива, обусловленный теплотерями, и удельные капитальные затраты в этом случае увеличиваются в большей степени при высокотемпературных способах. Кроме того, агломерационное и обжиговое оборудование малой единичной мощности промышленностью не выпускается, а нестандартное оборудование существенно дороже.

3.5. Вельц-процесс

Вельцевание является процессом восстановительной возгонки цинка, свинца и кадмия во вращающейся трубчатой печи. Его уже более 65 лет применяют для обогащения бедных цинковых и свинцовых руд, а также для переработки цинксодержащих отходов предприятий цветной металлургии (разд. 5.2.3.1). Способ отличается универсальностью, простотой обслуживания. При вельцевании цинксодержащих отходов их в неокомкованном виде загружают с твердым восстановителем в наклонную вращающуюся печь. Шихта проходит через нее в противотоке с дымовыми газами. Пары цинка и оксид углерода выделяются из шихты и дожигаются в свободном пространстве печи.

Перевод цинка в летучее состояние может интенсивно осуществляться только в интервале температур его кипения (906°C) и плавления шихты в печи. Возгонка наиболее интенсивна при $980-1000^{\circ}\text{C}$. По мере размягчения шихты условия для улетучивания цинка ухудшаются. Для отверждения шихты и предотвращения образования настывлей вельцевание проводят с избытком твердого восстановителя, значительная часть которого отделяется и возвращается в процесс. Продукты окисления возгонов (оксиды цинка и свинца) удаляются из печи с отходящими газами и осаждаются в фильтрах.

Отсутствие участка окомкования материалов при переработке отходов вельцеванием обуславливает значительно более низкие по сравнению с металлизацией во вращающихся печах капиталовложения и эксплуатационные расходы и в то же время предопределяет повышенный выход мелких фракций железосодержащего продукта, не пригодных для непосредственной загрузки в доменные печи (Опыты...).

Увеличению выхода основного продукта вельцевания — вельц-оксидов — и тем самым повышению экономичности установок для переработки металлургических отходов Вельц-процессом способствует повышенное содержание цветных металлов в исходном сырье. В черной металлургии к нему относится пыль электросталеплавильных печей, которая может содержать около 20% Zn, что позволяет получать вельц-окислы с его концентрацией 52-58%.

Такая технология реализована на заводе «Азер» (Бильбао, Испания). За год здесь перерабатывается 80 тыс. т пыли с 20% Zn и 3% Pb. Эта пыль в смеси с 24 тыс. т угля и 12 тыс. т песка подвергается термообработке в обжиговой вращающейся печи при 1250°C. Целевым продуктом технологии являются 30 тыс. т вельц-окислов с 54% Zn и 10% Pb. Их увлажняют, брикетируют, нагревают до 500°C во вращающейся печи, а затем подают на горячее брикетирование. Большую часть брикетов горячего прессования отправляют в Японию. В качестве побочного продукта получают также 50 тыс. т шлака, используемого при строительстве дорог.

Помимо рассмотренного основного варианта вельцевания, известны и другие его способы. В частности, в Японии переработку пылей с высоким содержанием цинка осуществляют процессом ХТР. Количество углерода, применяемого в нем, достаточно лишь для восстановления оксидов цинка и свинца, необходимая температура поддерживается сжиганием керосина. Другим вариантом вельцевания является применяемый в Северной Америке ХРД-процесс, отличительная особенность которого — использование известняка с целью снижения температуры перерабатываемого материала (*Pres...*).

Известен также способ отдельного удаления цинка и свинца из пылей черной металлургии, главным образом электросталеплавильных. Пыль вначале находится в трубчатой вращающейся печи с окислительной атмосферой при 1000-1100°C в течение 1 ч. В результате из пыли возгоняются оксид свинца (PbO), хлор и щелочи. Затем к шихте добавляют уголь и обрабатывают 2 ч при 1150-1350°C. В этих условиях цинк восстанавливается до металла и возгоняется, однако при наличии в печной атмосфере кислорода он окисляется до ZnO и в виде тонкой пыли улавливается (Заявка 4209891 ФРГ).

Недостатки вельцевания: большой расход топлива; трудности регулирования температуры и состава шихты с целью предотвращения образования настывей; переработка пылей и шламов, содержащих не менее 4% Zn.

3.6. Плавка в жидкой ванне

В настоящее время большое внимание уделяется жидкофазным процессам прямого восстановления, которые представляются перспективными для производства чугуна с использованием мелкокусковых железосодержащих материалов и малоценных сортов угля. Сущность этих процессов заключается в восстановлении металлов из их оксидов, находящихся в шлаковой ванне с замешанным в ней углем.

Для промышленного опробования жидкофазного восстановления на НЛМК построена опытная установка производительностью по металлу до 45 т/ч. Основу технологии составляет восстановительная плавка железосодержащих материалов, проводимая в одну стадию в плавильно-восстановительном агрегате. Несомненным достоинством нового процесса является возможность использования материалов без предварительного окускования. Железосодержащая шихта и уголь без специального смешения подаются к агрегату системой конвейеров и загружаются через отверстие в своде на шлаковую ванну, барботируемую через боковые фурмы кислородсодержащим дутьем. В ванне при 1500-1600°C происходит плавление шихты и замешивание угля в барботируемую зону с его пиролизом и удалением летучих. Восстановленные и науглероженные в шлаковой ванне капли железа (чугун) опускаются на подину агрегата, образуя металлическую ванну с температурой 1375-1450°C. Чугун и шлак выпускаются из печи через отдельные сифонные устройства с отстойниками (безнапорным способом). Газы удаляются из рабочего пространства при 1500-1800°C (в зависимости от степени их дожигания) через дымоотводящий патрубок, проходят котел-утилизатор и мокрую газоочистку (Роменец).

В 1985-1988 гг. на печи жидкофазного восстановления проверялась технология комплексной переработки металлургических пылей и шламов, предусматривающей получение наряду с чугуном концентратов цинка и свинца. При этом из шихты удалялось до 99,5% Zn, 40-60% щелочных металлов. На основании полученных данных подготовлены технологические задания на строительство установок по утилизации цинксодержащих доменных шламов КМК и смеси шламов НЛМК.

Технология переработки отходов в жидкой ванне, или печи Ванюкова, известная также как русская плавка (Romelt) в настоящее время запатентована в 16 странах, в США, Японию, Индию на право ее использования проданы лицензии (Переработка...).

Другим вариантом жидкофазного процесса прямого восстановления, применяемым для переработки железосодержащих отходов предпри-

ятий черной металлургии, является способ плавки металлургических пылей с циркуляцией расплавленного металла в агрегате, состоящем из двух параллельно расположенных ванн. Шихту и углеродсодержащий восстановитель подают на поверхность циркулирующего в замкнутом контуре расплава. Частичное восстановление оксидов металлов сопровождается образованием шлака, отделяемого от расплавленного металла, и газа, дожигаемого над поверхностью освобожденного от шлака расплава. Возгоняющиеся при восстановлении цинк и свинец улавливаются в газоочистных устройствах (Pat 4701217, США).

3.7. Технологии с использованием нетрадиционных источников энергии

К нетрадиционным источникам энергии при переработке железосодержащих отходов относятся низкотемпературная плазма и солнечная энергия.

Низкотемпературная плазма в настоящее время представляется перспективной при переработке отходов, содержащих ценные элементы или вредные для окружающей среды примеси. Ее применение обеспечивает получение материалов с улучшенными и особыми свойствами, интенсифицирует и упрощает в ряде случаев технологический процесс металлургического производства, дает высокие технико-экономические показатели, несмотря на тенденции вовлечения в производство бедного и трудно перерабатываемого сырья.

Плазма — это вещество в сильно ионизированном состоянии, причиной которого могут являться высокая температура или столкновение частиц газа с быстрыми электронами (в газовом разряде). Плазма имеет примерно равные концентрации электронов и положительно заряженных ионов, в целом оставаясь электрически нейтральной. Показано, что электроны плазмы находятся в хаотическом движении, средняя кинетическая энергия которого (температура) больше, чем нейтральных частиц и ионов газа. Иначе говоря, *электронный газ в плазме имеет как бы более высокую температуру, чем действительная температура плазмы*. В электрическом поле он сравнительно медленно продвигается в сторону анода. В космическом пространстве плазма — наиболее распространенное состояние вещества.

Одно из основных устройств плазменной технологической установки — *плазматрон* (генератор низкотемпературной плазмы). В таких установках, как правило, используются дуговые плазматроны, в которых плазма образуется за счет нагрева вещества электрической дугой, горячей между катодом и анодом. Плазменные генераторы можно разделить

на устройства прямого и косвенного действия. В первом случае передача тепловой энергии от дуги к перерабатываемому веществу (отходам) происходит при его контакте с токопроводящим столбом дуги. Если отходы имеют высокое содержание металлов (электропроводны), то они могут быть включены в электрическую цепь питания дуги в качестве одного из полюсов (анода или катода). При использовании плазматронов второго типа теплоперенос к отходам осуществляется при помощи бестоковой плазмы, образующейся при прохождении и нагреве рабочего тела (газа, водяного пара) через область электрической дуги. Плазматроны выдают так называемую низкотемпературную плазму (4000-20000 К), применительно к переработке отходов — 4000-5000 К.

Выбор способа нагрева определяется конкретными условиями применяемой технологии. Так, в плазматронах прямого действия эффективность теплопередачи может быть существенно выше, но при этом возникают проблемы поджига дуги, устойчивости ее горения и т.п. Мощности плазматронов в установках по переработке отходов может составлять от нескольких киловатт до нескольких мегаватт. Ресурс их работы зависит от многих факторов, однако лучшие конструкции плазменных генераторов обеспечивают сотни часов непрерывной эксплуатации (*Муниципальные...*).

Другим важнейшим элементом плазменной установки по переработке отходов является *плазменный реактор*, т.е. тот объем, в котором происходит процесс химического разложения отходов. Плазматрон может быть совмещен с реактором, являясь составной частью последнего, или пристыкован к нему. Реактор обычно выполняют в виде печи, например шахтной, либо проточной камеры. Разнообразны и методы подготовки и подачи отходов в реакционный объем. Для твердых отходов применяют брикетирование. Подачу организуют непрерывной или дискретной. Пастообразные отходы могут разбавляться растворителями либо подогреваться до заметного снижения вязкости.

Далее по технологической схеме установки располагаются системы «закалки» образующихся продуктов деструкции, фильтрации, дожигания — в различных сочетаниях, в зависимости от видов отходов и задач, решаемых на данной установке.

Концентрация значительной энергетической мощности в малом объеме плазменного реактора ведет к сокращению производственных площадей, занятых оборудованием установки, и уменьшению его габаритов.

Применительно к утилизации пылей и шламов черной металлургии плазменные технологии используют в ряде стран.

На заводе фирмы «Скэндаст» (Швеция) для переработки сталеплавильных пылей эксплуатируется установка проектной мощностью 70 тыс. т/год, работающая процессом «Плазмадаст» (рис. 3.2). В

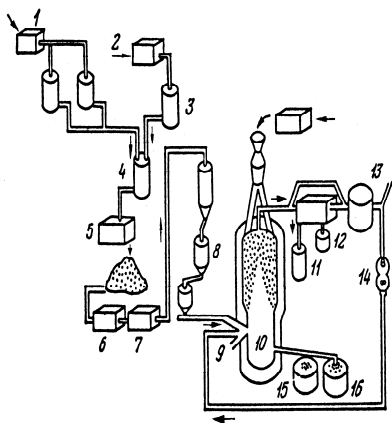


Рис 3.2. Схема процесса Плазмадаст:

- 1, 2 — бункера для отходов и угля соответственно; 3 — мельница; 4 — смеситель; 5 — фильтр; 6 — дробилка; 7 — классификатор; 8 — циклон; 9 — плазматрон; 10 — шахтная печь; 11, 12 — бункера для оксидов цинка и свинца соответственно; 13 — газоохладитель; 14 — компрессор; 15, 16 — емкости для железосодержащих продуктов и шлака соответственно

шлам, поступающий на завод, добавляют воду (до ее содержания 50%), уголь и флюс (песок), смесь перемешивают, обезвоживают, сушат и подают питателем в шахтную печь, оборудованную тремя плазматронами мощностью по 6 МВт. В струе плазмы происходит плавление и восстановление оксидов металлов. При этом цинк и свинец испаряются и выносятся из печи с отходящими газами, собираясь затем в виде жидкого металла в конденсаторе.

Помимо пыли, в ежегодно перерабатываемый объем шихты входит 12,6 тыс. т угля и кокса, 6 тыс. т песка. Готовой продукцией являются 15 тыс. т цинка с содержанием 1-2% свинца, 28 тыс. т свинца, 13,8 тыс. т чугуна, 30 тыс. т шлака, используемого в строительстве. Часть колошникового газа после компримирования применяют в качестве технологического в плазматроне, другую часть его направляют на сушку сырьевой смеси.

Процесс «Плазмадаст» характеризуется высоким коэффициентом использования энергии и низкими эксплуатационными затратами.

Итальянская фирма «Acciai Speciali Terni» создала Ilserv-process переработки пылей и шламов, прокатной окалины в плазменно-дуговой печи постоянного тока мощностью 7 МВт при производительности установки 20 тыс. т/год по исходному сырью. Железосодержащие материалы, уголь и известь непрерывно загружают через сводовое отверстие печи, расплавляя их в плазменно-дуговой зоне. Плазмообразующим газом служит азот, вдуваемый в печь через центральный канал в графитовом электроде. Продуктами плавки являются возгоны, хромо-никеле-марганцевые сплавы, шлак. В возгоны переходят оксиды цинка, кадмия, свинца, образующие шлам с высоким их содержанием, перерабатываемый на заводах цветной металлургии. В сплавы перехо-

диг более 95%Ni и 85%Cr. Их используют в шихте дуговых сталелитейных печей. Шлак находит применение в строительстве.

Фирмой «Дэйви Мак-Ки» (Великобритания) разработан комбинированный процесс производства чугуна и ферросплавов путем предварительного восстановления шихтовых материалов в реакторе с кипящим слоем и последующей плавкой в плазменной печи. Особенностью последней является наличие в ее верхней части водоохлаждаемого патрубка, защищающего расположенный в нем плазматрон с нерасходуемым катодом от налипания капель расплава. Поскольку анод футерован в подине печи, плазменная дуга, стабилизируемая аргоном, образуется между катодом и расплавом. На полупромышленной установке освоена технология плазменной переработки металлургических пылей. Пыль, предварительно смешанную с коксом и флюсом, вдувают с достаточно высокой скоростью в печь через тангенциальные отверстия в стенке, расположенные на уровне нижнего торца плазматрона. При температуре в ванне печи около 1600°C образуются шлак и металл. Возгоняющиеся пары цинка, свинца и кадмия извлекаются из отходящих газов конденсацией в футерованной камере с жидким цинком, разбрызгиваемым с помощью мешалки.

При переработке по рассматриваемой технологии отходов (28,8% Fe₂O₃; 22% ZnO; 3,6% Pb₃O₄; 24,4% CaO) с добавлением коксика и песка получены чугун, маложелезистый шлак (2-4% FeO_x) и возгоны, содержащие 50-76% ZnO и до 10% Pb₃O₄. В настоящее время по этой технологии в Австралии и Южной Корее уже работают печи мощностью 1 и 5 МВт.

Плазменные технологии утилизации отходов применяют и в ряде других стран (Австрия, Бельгия, Канада, Германия и пр.).

Установка, работающая на энергии солнечной радиации, используется для термической деструкции отходов электродуговой плавильной печи. Она имеет две полости: одну для утилизации сконцентрированной солнечной радиации, другая применяется в качестве высокотемпературного реактора. В установку входит также параболический гелиостат площадью 120 м², обеспечивающий подвод к реактору мощности 10 кВт при интенсивности солнечной радиации 2000 кВт/м². Температура в рабочем пространстве реактора составляет при этом 1120-1400°C. При работе опытной установки обеспечивается деструкция 90% токсичных компонентов в исходных материалах. В отходящих газах содержатся пары цинка, свинца и хлорсодержащих компонентов (Recycling..., 2003 г.).

3.8. Пирометаллургические методы обогащения

Высокотемпературные технологии переработки металлургических пылей и шламов капиталоемки и требуют значительных эксплуатационных затрат. Одним из резервов улучшения их технико-экономических показателей является повышение содержания цветных металлов, в первую очередь цинка, в перерабатываемых пылях и шламах. Так, технология процесса «Плазмадаст» рентабельна лишь при утилизации значительных объемов пылей и шламов с высоким (более 20%) содержанием цинка (*Ррес...*). В Японии после 1977 г. строительство установок для металлизации окатышей из шламов с целью извлечения цинка прекращено (*Мещерякова...*). Именно поэтому в ряде стран одновременно начались работы по обогащению металлургических пылей и шламов цинком и другими цветными металлами до таких концентраций, которые требуются для экономичной утилизации. Отметим наиболее известные из них.

Фирмой «Нихон дзиреку сэно» (Япония) предложен способ переработки пылей и шламов электропечей для выплавки ферросплавов. Пыли и шламы смешивают с углеродом и хлорирующим агентом и загружают смесь в ковш с расплавленным шлаком, слитым из электропечей. За счет тепла шлака протекают реакции восстановления и хлорирования металлургических компонентов пылей и шламов. Затем шлак направляют на обогатительные фабрики (заявка 60-43444 Японии).

Близка к рассмотренной технология, предусматривающая загрузку сбрикетированной в смеси с мелким коксом и цементной связкой цинксодержащей пыли на поверхность расплавленного металла, выпущенного, например, из доменной печи. Железо пыли при этом на 65% извлекается в чугуна, а 98% Zn испаряется и переходит в возгоны, улавливаясь в виде оксида. Технология является эффективной, если температура металла не падает более чем на 10°C (*Zinc...*).

Ряд процессов предусматривает *вдувание* цинксодержащих пылей в расплавы различных металлургических агрегатов.

Технология фирмы «Сумитома киндзоку коге» предполагает вдувание железо- и цинксодержащей пыли в смеси с углем, воздухом или кислородом в жидкий чугуна. Если последний содержит около 4,5% углерода, то добавлять к пыли восстановитель не нужно (заявка 58-144437 Японии).

Компания «Кавасаки» испытала способ извлечения цинка, в соответствии с которым пыль в смеси с углем и воздухом инжектируют в кислородный конвертер. Цинк возгоняется и улавливается системой пылеочистки, а железо и силикатная составляющая усваиваются соот-

ветственно сталью и шлаком. В 1998 г. предполагалось приступить к сооружению установки, способной переработать всю пыль ДСП Японии (~500 тыс. т).

Фирмами «Круп-Клэкер» (ФРГ) и «Бэтликэм стил» (США) проведены промышленные испытания по вдуванию электросталеплавильной пыли в ванну дуговых печей. Определено, что около 70-100% Zn и не менее 80% Pb переходят в получаемый цинковый концентрат. Одновременно установлено снижение производительности печи и возрастание концентрации серы в выплавляемой стали (*Prec...*).

В целом предложенные способы извлечения цветных металлов из пылей при их инъекции в металлургические расплавы характеризуются простотой технологической схемы, сравнительно небольшими капиталовложениями и отсутствием топочных газов.

Значительный интерес представляет обогащение цветными металлами пылей при их возвращении в сталеплавильные агрегаты. Особенно хорошо исследованы и освоены процессы переработки электросталеплавильной пыли при ее рецикле в шихту ДСП на заводах США, Великобритании и других стран. Цикл замкнутой переработки предусматривает окомкование или брикетирование пыли совместно с коксовой мелочью без применения связующих и подачу окускованных материалов в печь (*Prec...*).

Такую технологию использует, в частности, японская фирма «Ниппон стил» на установке производительностью 40 тыс. т/год по исходной пыли, содержащей 20% Zn и 40% оксидов железа. Вторичные возгоны содержат уже 75% ZnO и только 15% Fe₂O₃ (70% железа из оксидов исходной пыли переходит в чугун электроплавки). При мощности ДСП 13 МВА на переработку 1 т пыли расходуется 1280 кВт·ч электроэнергии и 100 кг кокса. Обогащенная пыль перерабатывается с извлечением цинка (EAF...).

Аналогичным образом утилизируется порядка 160 тыс. т/год электросталеплавильной пыли, опилок, прокатной окалины нержавеющей стали на заводе «Южин Савой» во Франции. Получаемую богатую цинком пыль передают на заводы цветной металлургии (Reprocessing...).

Показатели отгонки цинка, свинца и других легколетучих соединений при электродуговой плавке их содержащих материалов заметно улучшаются при пропуске отходящих газов печи через коксовую насадку с температурой 1000°C. Пыль, уловленная коксовым фильтром, возвращается в печь. Прошедшие через него газы поступают в конденсатор, где быстро охлаждаются до 450°C с аккумуляцией в нем жидких цинка и свинца (The technology...).

Вышерассмотренные способы пирометаллургического обогащения отходов обычно предусматривают их попутную переработку в рамках какого-либо основного технологического процесса и на его оборудовании. Однако в ряде случаев интерес представляют способы утилизации пылей и шламов со 100%-м их содержанием в рудной части.

Опробованы, например, способы пирометаллургического обогащения и плавления шламов, богатых цветными металлами, в индукционных электропечах.

Так, по американскому патенту, негранулированная пыль, содержащая цветные металлы, загружается в индукционную печь. По окончании загрузки через пористую керамическую вставку в дне тигля подают природный газ. При нагреве цинк, свинец и кадмий испаряются и газовым потоком вносятся в конденсатор, где их пары охлаждаются и оседают на дне в виде сплава. Образующийся в конце процесса железистый расплав рафинируют в этой же печи (Pat. 4762554 США).

Японский процесс ВНР (Vacuum Heating Reduction) предусматривает переработку пыли в вакуумной индукционной печи (остаточное давление 133 Па) в течение 30 мин при 450-900°C. Технология реализуется в 3 стадии. На первой при указанных остаточном давлении и температурах из пыли возгоняются натрий, калий, свинец и его соединения (PbO , $PbCl_2$, PbF_2). На второй стадии, используя в качестве восстановителя железо или его оксид (FeO), производят отгонку цинка при соотношении восстановитель/ ZnO , равном $10 \div 3:1$. На третьей стадии остатки пыли охлаждают в вакууме или атмосфере азота и брикетируют в качестве сырьевого материала (Новая...).

Технология ВНР реализована на установке производительностью 10 тыс. т/год пыли на заводе фирмы «Аиши стил воркс» в Тита. При расходе электроэнергии 540 кВт·ч/т пыли затраты на переработку этого количества составляют 100 дол. против 250 дол./т при стабилизационной обработке и удалении пыли на свалку (New...).

Привлекает внимание переработка ряда отходов черной металлургии методом циклонной плавки. Получивший известность в 40-50-х гг. прошлого века, он интенсивен и заключается в следующем. В верхнюю часть вертикального цилиндрического реактора тангенциально с большой скоростью (100 м/с и более) совместно подается дутье, перерабатываемый материал и топливо (известны также схемы отдельной подачи дутья, топлива и шихты). При этом образуется быстро вращающийся вихрь (циклон). Под действием высокой температуры топливо воспламеняется, шихта плавится, расплав отбрасывается на стенки циклона и в виде пленки стекает в низ реактора, где разделяется на металлическую и шлаковую фазы (Основы..., 71, ч. 1). Интенсифика-

ция плавки достигается тем, что частицы шихты под действием центробежных сил попадают на пленку расплава и под действием горячих газов, движущихся с большой скоростью, быстро растворяются в ней с образованием конечных продуктов плавки.

В последние годы циклонная плавка под названием «КОНТОП»- процесс начала применяться для переработки некоторых промышленных отходов, в частности цинксодержащих пылей черной металлургии и легкой фракции автомобильного металлолома.

Так, с 2000 г. КОНТОП-установка используется фирмой «Харцер Цинк» (Австрия) для утилизации цинксодержащих пылей и шламов ДСП и вагранок. Показатели процесса: содержание цинка в исходной пыли 10-35%; производительность установки 4,5-5,0 т/ч; расход, м³/т: кислород — 250; транспортирующий воздух — 75-100, природный газ — 27,5; выработка пара 7,0-7,5 т/ч; производство электроэнергии — 200-250 кВт·ч/т сырья; температура плавки 1800-2000°С. Основная продукция — пыль (оксида цинка 58-60%) в количестве 0,8-1,0 т/ч, продаваемая производителям цинка по цене 50-60 дол./т, а также шлак (1,7-2,2 т/ч), используемый при строительстве порта.

Предполагалось, что в 2005 г. должны были быть начаты пусконаладочные работы по использованию технологии «КОНТОП» для утилизации всех отходов от порезки автомобилей и летучих зол со швейцарских установок по сжиганию мусора (Зауэрт).

В целом в настоящее время из пылей ДСП извлекают не менее 2% мирового производства цинка, или около 160 тыс. т/год.

3.9. Другие способы

Помимо вышерассмотренных развернутых сообщений о различных способах применения пылей и шламов, имеется информация и о других вариантах их утилизации.

Так, заявлено использование сталеплавильных шламов в производстве цемента (Сырвеая...). Такой способ переработки применяют, в частности, в Свердловской области (Нижнетагильский цементный завод). Здесь пыль подают в качестве железосодержащей добавки в цементную сырьевую смесь. Потребность в железосодержащих добавках составляет 3-5% от массы цемента, или 1,0-1,5 млн т в целом по России.

Перспективной является попутная переработка пылей и шламов в крупномасштабных процессах цветной металлургии. При этом часть цветных металлов извлекается в целевые продукты, например медь — в штейн и далее в черновую медь. Остальная часть отходов переходит

в шлаки с последующим их использованием в народном хозяйстве (Лотош... Концептуализация...).

Известно применение пылей газоочистки электросталеплавильного передела в составе дефосфорирующих смесей при производстве стали. При содержании пыли 15-30% от массы смеси они повышают ее дефосфорирующую способность и скорость этого процесса (А.С. 1379316 СССР).

Железосодержащие отходы эффективно применяются также как наполнители в бетонах и отошающие присадки при производстве и обычных, и силикатных кирпичей, при сооружении плотин, шоссе и насыпей (Комплексное... 1988).

Колошниковая пыль пригодна для получения известково-железистого флюса, утилизируемого в сталеплавильном производстве Орско-Халиловского металлургического завода. На череповецком заводе «Северсталь» применяют известково-магнезиальный флюс, получаемый с использованием шламов конвертерного цеха.